

平成 22 年 4 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007 ～ 2008  
 課題番号：19500227  
 研究課題名（和文）  
 空間課題解決過程における練習の効果—事象関連 fMRI と眼球運動同時計測  
 研究課題名（英文） Training effects on the spatial task solving process – Simultaneous measurement with event related fMRI and eye movement recording  
 研究代表者  
 高平 小百合（TAKAHIRA SAYURI）  
 玉川大学・教育学部・准教授  
 研究者番号：80320779

## 研究成果の概要：

心的回転課題において、練習による performance の変化と cortical plasticity を検証した。5 回の練習 session の後、平均反応時間は有意に短くなり顕著な学習曲線が得られた。皮質レベルにおいては、予想に反して練習前よりも練習後の方が、また Novelty task よりも Training task の方が、賦活レベルが高くなっていた領域(e.g., Motor area)が多くなっていた。一方で、それら賦活領域の個人差も大きく、練習によって異なる neural network が効率化されることが示唆される。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：事象関連 fMRI

## 1. 研究開始当初の背景

我々は日常生活の中で地図を読んだり物体を異なる角度からイメージしたり、また、学校教育の中では算数（展開図や図形の投射）や幾何学などで、心的回転を経験している。Shepard & Metzler(1971)によって開発された心的回転課題については多くの研究がなされ、行動実験のみならず fMRI 実験からも個人差や性差が非常に大きいことが知

られている(Koshino et al. 2005, Jordan & Wustenberg 2005, Janke & Jordan 2007, Zacks 2008)。個人差の要因を探る研究として、眼球運動の違いに注目した研究も報告されている(Just & Carpenter 1975, 1985, Shiina et al. 1997, Alexander et al., 2007)。一方、心的回転課題は練習によって成績が向上すること(個人内変化)も多くの行動実験結果から周知の事実である(Bethell-Fox &

Shepard,1988., Heil et al., 1998)。しかしながら、心的回転課題においては練習による脳活動の変化(cortical plasticity)に関する研究はまだない。

(1)心的回転課題解決時の脳賦活部位: Zack (2008)による 32 の研究を基にしたメタ分析及びJordan & Wustenberg(2005)による 100 名近くの被験者を対象とした分析では、

①Superior & inferior parietal regions, ②extrastriate visual regions, ③motor and/or premotor regions, ④inferior and middle frontal regions 等が、共通して心的回転課題に必要とされる賦活部位であることがわかっている。

(2)練習による成績向上に関する行動実験研究(Behavioral plasticity):練習による成績向上(reaction time & Error rate)については、以前から学習曲線( Power-law of practice)が提唱されている(Newell & Rosenbloom, 1981)。心的回転課題においても、行動実験では同様の結果が報告されている(Bethell-Fox & Shepard,1988., Heil et al., 1998)。

(3)練習による皮質可塑性に関するfMRI実験研究(cortical plasticity): 心的回転課題でのfMRI 研究はないが、Category learning (Hemhel et al., 2004)においては V1, V2, V3 が、spatial working memory task(Little & Thulborn 2006)においては IPS/SPL に、有意な非線形(Inverted U-shape) process が見られた。練習による cortical plasticity の実験に関しては、少なくとも 3 回の fMRI 測定が必要であることが示唆された。

(4)認知処理の違いを抽出する手段としての眼球運動測定: Shiina ら(1997)は異なる認知処理によって心的回転課題解決時の眼球運動パターンが異なることを明らかにしている。また、申請者による前 fMRI 実験研究で

は、High performer と low performer では、眼球運動パターンが異なることが示唆された(Takahira et al. 2006)。従って、練習による個人内の変化についても眼球運動パターンが第 2 行動変数になりうることが示された。

## 2. 研究の目的

本研究は、空間認知(心的回転)課題の練習過程に起こる変化をより良く理解するために、performance の変化と cortical plasticity との関連を検証するものである。具体的な研究目的は以下のとおりである。

(1) 練習による行動レベルでの変化: ①5 session(9 回)の練習によって、performance (平均反応時間: mean RT, 平均誤答数: mean number of error)がどのように変化するか検証する。②心的回転課題のカテゴリー (same /mirror) によって練習の効果(mean RT & mean numb. Of error )が異なるかどうかを検討する。③回転角度(0, 40, 80, 120, 160)により、performance(mean RT, mean number of correct)における練習の効果が異なるか検証する。

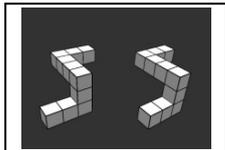
(2) 皮質レベルでの変化: 練習による賦活部位の変化を以下の 2 点: ①Training set において session1(練習前)と session5(練習後)の賦活領域の違い、②session5 での Training Task と Novelty Task の賦活領域の違い、について検証する。

## 3. 研究の方法

(1)被験者: 被験者は、都内私立大学・教育学部に所属する学生の中から、事前の心的回転 paper-test(Peters et al, 1995)により、成績が平均点以上であり、右利き男子であることを条件に 15 名 (平均年齢=20.3 歳) 選ばれた。各被験者は、5 日間(5 回)の実験参加により、最終日実験終了後に謝礼として 2 万円が支払われた。

(2)課題：心的回転課題は、回転の方向やブロックの形状の違いによって4種類(setA, setB, set C, setD)作成し(Wustenberg, 2007)、それらは4つの目的(①training tasks, ②repetition tasks, ③novelty1 tasks, ④novelty2 tasks)に、それぞれ被験者間で counter balance されている。

図1 心的回転課題



(3)手続き：各被験者は、月曜から金曜までの5日間で5回の session に参加し、session1, session3, session5 においては、行動実験及び fMRI での計測を行った。Session2(2日目)と session4(4日目)では行動実験のみを行った(表1参照)。

表1 実験スケジュール

Sess.	Measurements			Tasks	
	Beh	emr	MR		
Day1	Beh1	emr1	MR1	Training	80
Sess1	Beh2	emr2	MR2	Repetition	80
	Beh1	emr1	-	Training	80
	Beh2	emr2	-	Training	80
Sess2	Beh3	emr3	-	Training	80
	Beh1	emr1	MR1	Training	80
	Beh2	emr2	MR2	Repetition	80
Sess3	Beh3	emr3	MR3	Novelty1	80
	Beh1	emr1	-	Training	80
	Beh2	emr2	-	Training	80
Sess4	Beh3	emr3	-	Training	80
	Beh1	emr1	MR1	Training	80
	Beh2	emr2	MR2	Repetition	80
Sess5	Beh3	emr3	MR3	Novelty2	80

(4) 実験装置とデータ分析

①行動分析：統計分析ソフト SPSS17 を用いて、反応時間と誤答数に関して多変量検定を行った。眼球運動測定装置は、Arlington Inc. View Point(Sampling frequency = 30Hz,

One side eye Measured by cornea reflection of infra-red)を使用した。

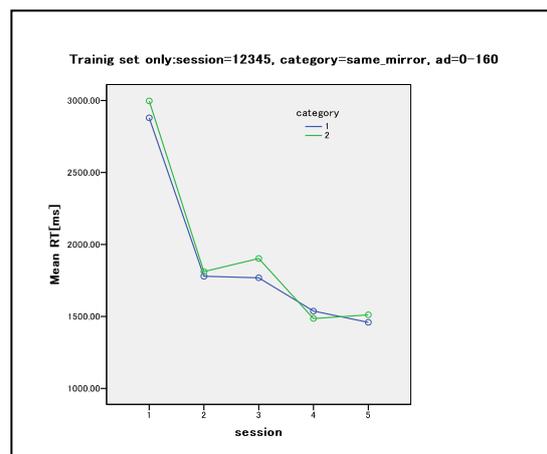
②fMRI 装置とデータ分析：機能的磁気共鳴装置(fMRI scanner: Siemens 1.5T)を使用し、EPI Sequence (TR=2000ms, TE=50ms, vox=3.8×3.8×3.8mm, flip angle=90 degree)によってデータを取得した。データ分析は、SPM8 (Statistical Parametric Map version 8) を用いて realign, normalize, smooth を行った後、一般線形モデルによる Analysis of Variance 及び T-test による分析をおこなった。

4. 研究成果

(1)行動レベル分析の結果：練習の効果を検証するために、3つの独立変数:session(5 level), task(3 level), angular disparity(5 level)と2つの従属変数：反応時間(reaction time)と誤答数(number of error)を用いて多変量検定を行った結果を以下に記述する。

①5回の練習セッションによる Training task の平均反応時間の変化を図2と誤答数の変化を図3に示す。

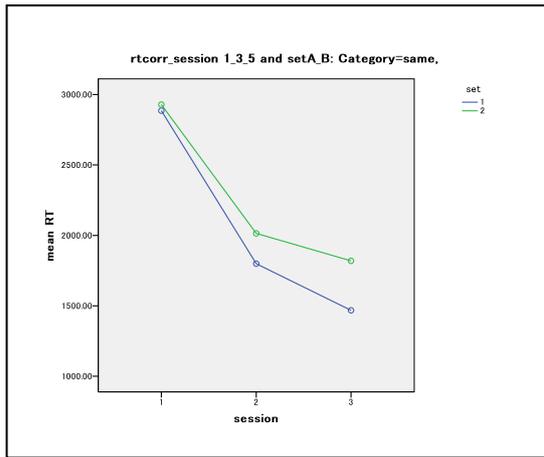
図2 5回の練習セッションによる Training task の平均反応時間(category1 は same image 図形、category2 は 1 mirror image 図形を表わす)



先行研究(Little & Thulborn,2006., etc.)で示されたとおり、学習曲線が描かれることがわ

かる。平均反応時間は1回目に比べ2回目以降は有意に短くなっている( $F=10.315$ ,  $df=4, 5$ ,  $p=0.012$ )。

②次に、MRI session 時のみに提示された Repetition Task(3回練習)と Training Task(9回練習)では、練習の効果(mean RT)が異なるかどうかを検証した。結果を図3に示す。図3 Repetition Taskと Training Taskの練習による平均反応時間の変化(set1は Training Task、set2は Repetition Task)



Sessionの主効果は有意( $F=41.76$ ,  $df=2,7$ ,  $p<0.0001$ )であったが、Task(RepetitionとTraining)の主効果は有意ではなかった( $F=3.83$ ,  $df=1,8$ ,  $p=0.086$ )。また、交互作用も有意ではなかった( $F=2.02$ ,  $df=2,7$ ,  $p=0.202$ )。

③回転角度(0, 40, 80, 120, 160)により、performance(mean RT)における練習の効果が異なるかどうかを検証した。

図4 回転角度別による平均反応時間の変化(adは回転角度を表わす:  $ad1=0^\circ$ ,  $ad2=40^\circ$ ,  $ad3=80^\circ$ ,  $ad4=120^\circ$ ,  $ad5=160^\circ$ )

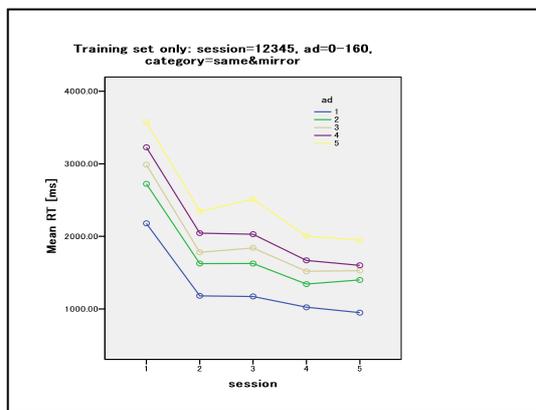
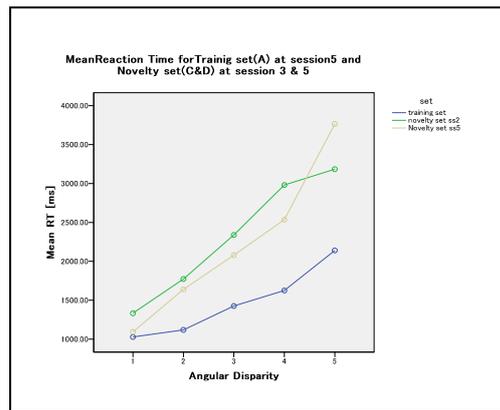


図4に結果のグラフを示す。回転角度の主効果は有意( $F=60.31$ ,  $df=4,5$ ,  $p<0.0001$ )であったが Sessionと回転角度との交互作用は有意ではなかった( $F=4.202$ ,  $df=8,1$ ,  $p=0.361$ )。

④Training task(9回目)と Novelty task(1回目)の反応時間の違いについて検証した。

図5 Training taskと Novelty taskの違い(set1は training task, set2は session3での Novelty task, set3は session5での novelty taskを表わす: angular disparityは  $1=0^\circ$ ,  $2=40^\circ$ ,  $3=80^\circ$ ,  $4=120^\circ$ ,  $5=160^\circ$ を表わす)



回転角度( $F=37.47$ ,  $df=4,5$ ,  $p<0.001$ )と task( $F=23.51$ ,  $df=2,7$ ,  $p<0.001$ )の主効果がそれぞれ有意であった。また、回転角度と taskの交互作用は有意ではなかった。

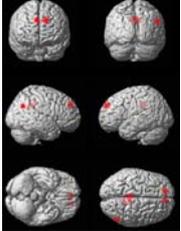
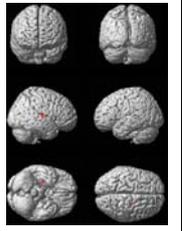
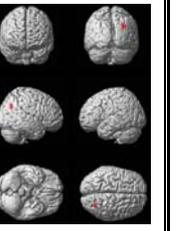
(2)皮質レベルの分析結果:

皮質レベルでは、第一に練習の前後での血流変化(増加した領域と減少した領域)を検証し、第二に課題の新規性(練習課題と新規課題)による賦活領域の違いについて検証する。また、賦活領域の個人差が大きいため、3名の被験者ABC個別の分析結果を示す。

①Training taskにおける練習前(session1)と練習後(session5)の賦活領域の違いを図6と図7に示す。認知課題においては、練習によってより効率的な neural network 処理が可能となり活動レベルが減少すると考えられる(Kelly et al., 2006)。Spatial transformationに関わる領域(R. R middle cingulate gyrus & R. ICP)、反応に関わる領域(R. middle occipital gyrus)などに減少がみられた

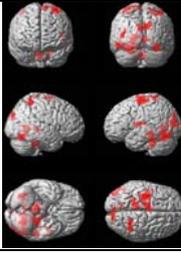
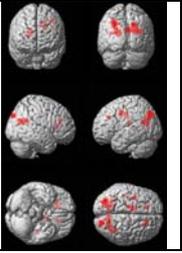
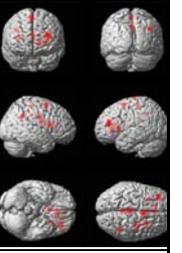
(Zacks, 2008, De Lange et al., 2005)。

図6 練習前より練習後の方が活動が減少した領域(Session1-session5 :Training task)

被験者A	被験者B	被験者C
R middle cingulate gyrus	R & L putamen	R middle occipital gyrus
L precuneus	R IPC	
		
Session1-session5 masked included by session1 at p=0.05 (P<0.01, uncorrected, k=5 voxels)		

練習前より練習後に活動が増加するのは Motor task によくみられ、練習により新しい neural network が追加されたか、または既存の network が強化された可能性が考えられる(Kelly et al., 2006)。

図7 練習前より練習後の方が活動が増加した領域(Session5-session1:Training task)

被験者A	被験者B	被験者C
L Fusiform gyrus	R superior occipital gyrus	L middle frontal
R & L Lingual gyrus	R anterior cingulate gyrus	R Putamen
L Hippocampus		R hIP1
R cuneus	R. Precuneus	
L & R rolandic Operculum	L Rolandic operculum	R SMA(A4a)
L Calcarine gyrus	L calcarine gyrus	
L Insula		L Insula
R SPL		
L precentral-A4	L precentral gyrus	
		
Session5-session1 masked included by session 5 at p=0.05 (P<0.01, uncorrected, k= 5 voxels)		

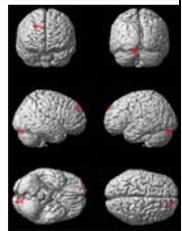
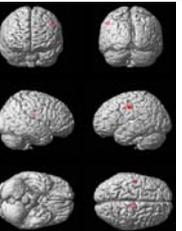
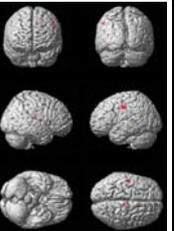
図形をイメージし Motor simulation に関わ

る領域である SMA, precentral gyrus などや、rotation に関わる Rolandic Operculum, Anterior cingulate gyrus, R. hIP1 等において賦活増大がみられた。被験者 A に関しては、刺激図形に関わる領域(Lingual gyrus, fusiform gyrus, hippocampus)においても練習後の方が賦活レベルが高くなっていた。

②session5 での Training Task と Novelty Task の賦活領域の違い

最終 session5 においては、Training task (9回目)の方が初めての Novelty task(1回目)よりも、賦活レベルが高い領域が多かった。図8に Novelty task の方が Training task より活動が高かった領域、図9に Training task の方が Novelty task より活動が高かった領域を示す。

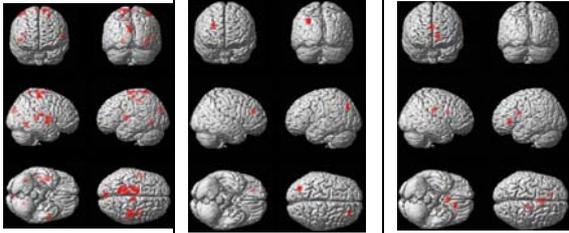
図8 session5 において Novelty task の方が Training task よりも活動レベルが高かった領域

被験者A	被験者B	被験者C
L cerebellum	L. postcentral gyrus (A4a,4p,6)	L. middle cingulate cortex
R. superior frontal gyrus		
		
Novelty task - Training task masked included by Novelty task at p=0.05 (P<0.01, uncorrected, k=5voxels)		

Novelty task の方が Training task よりも活動レベルが高かった領域は各被験者ともごくわずかであった。反応に関わる領域(post central gyrus)、図形比較に関わる領域(R. superior frontal, Left middle cingulate cortex)などにおいて、Novelty task の方が賦活レベルが高くなっていた。被験者 A 及び B においては、Training task の方が Novelty task よりも活動レベルが高い領域が多くみら

れた。特に、Visual processing に関わる領域(L. Precuneus, L. cuneus, L. middle occipital gyrus)及び、図形比較(L middle cingulate cortex)や図形認識(R superior temporal)に関する領域、また Motor control に関わる領域 (SMA)などが高かった。

図 9 session 5 において Training Task の方が Novelty Task よりも活動レベルが高かった領域

被験者 A	被験者 B	被験者 C
L. Precuneus SPL	L. middle occipital gyrus	L. anterior cingulate gyrus
R. Insula:	R. middle frontal gyrus	
L. cuneus	R. precuneus	
R superior temporal	R. SPL	
R. Putamen:	R. Angular gyrus	
R. SMA:area6		
L. Rolandic operculum		
L. ligual gyrus		
L middle cingulate		
		
Training task- Novelty task masked included by Training task at $p=0.05$ ( $P<0.01$ , uncorrected, $k=5$ voxels)		

被験者 C に関しては、注意など関わる anterior cingulate gyrus が高くなっていた。

### (3) 考察

行動レベルの分析では、学習曲線に反映されているように、練習の効果が平均反応時間に顕著にみられた。また、Training task と Novelty task の間にも反応時間の有意な差がみられ、Training task の方が平均反応時間が短かく予想通りであった。皮質レベルでの変化に関しては、空間認知課題である心的回転課題については、練習後の方が performance の向上とともに効率的な neural network の獲得により賦活レベルが

低くなると予想したが、実験の結果練習後(9回目)の方が練習前(1回目)よりも、また初めての課題より練習した課題の方が幅広い領域にわたって賦活レベルが高くなっていることがわかった。しかしながら、個人差が大きく performance の個人差や strategy の個人差も考慮して今後のより詳細な分析を進めなければならない。

本研究は、Dr. Kirsten Jordan (Ludwig-Meyer Institute for forensic Psychiatry and Psychotherapy, Georg August University Göttingen) 及び Dr. Torsten Wustenberg (Department of Psychiatry and Psychotherapy, Charité - University Medical Center Berlin) との共同研究である。

5. 主な発表論文等  
なし

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

高平 小百合 (TAKAHIRA SAYURI)  
玉川大学・教育学部・准教授  
研究者番号：80320779

#### (2) 研究分担者

藤原 浩樹 (FUJIWARA HIROKI)  
山形大学・医学部・助教  
研究者番号：50433868

#### (3) 連携研究者

奥田 次郎 (OKUDA JIRO)  
京都産業大学・コンピュータ理工学部・准教授  
研究者番号：80384725

#### (4) 連携研究者

松田 哲也 (MATSUDA TETSUYA)  
玉川大学・脳科学研究所・助教  
研究者番号：30384720

#### (5) 連携研究者

佐々木 寛 (SASAKI HIROSHI)  
玉川大学・工学部・准教授  
研究者番号：70261691